

539, 770

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international(43) Date de la publication internationale  
5 août 2004 (05.08.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
WO 2004/065896 A1(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> :

G01B 7/004, G01D 5/20

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : LESCOUR-  
RET, Jean-Louis [FR/FR]; Thales Intellectual Property,  
13, av. du Prés. Salvador Allende, 91117 Arcueil cedex  
(FR).

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/FR2002/004507

(22) Date de dépôt international :

20 décembre 2002 (20.12.2002)

(74) Mandataires : ESSELIN, Sophie. etc.; Thales Intellec-  
tual Property, 13, av. du Prés. Salvador Allende, 94117 Ar-  
cueil cedex (FR).

(25) Langue de dépôt :

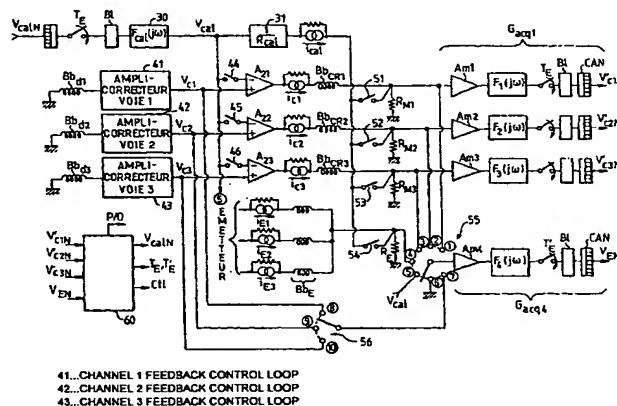
français

(26) Langue de publication :

français

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :  
THALES [FR/FR]; 173, boulevard Haussmann, 75008  
Paris (FR).(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ,  
BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ,  
DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,  
HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK,  
LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR MAGNETIC MEASUREMENT OF THE POSITION AND ORIENTATION OF A  
MOBILE OBJECT RELATIVE TO A FIXED STRUCTURE(54) Titre : PROCÉDE ET DISPOSITIF DE MESURE MAGNETIQUE DE LA POSITION ET DE L'ORIENTATION D'UN OB-  
JET MOBILE PAR RAPPORT A UNE STRUCTURE FIXE

(57) Abstract: The invention concerns a method and device for magnetic measurement of the position and orientation of a mobile object relative to a fixed structure. The device comprises, integral with the structure, a magnetic field emitting assembly with three orthogonal emitting coils ( $Bb<SB>E</SB>$ ) defining a reference mark and a sensing assembly, integral with the mobile object, with three channels for measuring the received field on three orthogonal detecting coils ( $Bb_{d1}$  to  $Bb_{d3}$ ), said channels incorporating each a feedback control loop (such as 41,  $A_1</math>,  $Bb<SB>CR1</SB>$ ,  $R<SB>M1</SB>$ ) delivering an output voltage (such as  $V_{c1}$ ) and a measuring current (such as  $i_{c1}$ ). A calibrating voltage, at different frequencies of useful frequencies of the fields, is injected into the channels of the sensor without disturbing the continuous measurement by measurement acquiring channels ( $G_{acq1}$ ), while a calibrating current ( $i_{cal}$ ) is superimposed on the measuring resistors. Thus it is possible to identify the variable components of the system and correct the measurement by inverting the respective transfer functions of the sensor channels. The invention is applicable in particular to helmet mounted sights.$

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé et un dispositif de mesure magnétique de la position et de l'orientation d'un objet mobile par rapport à une structure fixe. Le dispositif comprend, solidaire de la structure, un ensemble émetteur de champs magnétiques à trois bobines d'émission orthogonales ( $Bb_E$ ) définissant un repère de référence et un ensemble capteur, solidaire de l'objet mobile, à trois voies de mesure du champ reçu sur trois bobines de détection orthogonales ( $Bb_{d1}$ , à  $Bb_{d3}$ ),

[Suite sur la page suivante]

WO 2004/065896 A1



MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Publiée :**

— avec rapport de recherche internationale

(84) États désignés (*régional*) : brevet ARIPO (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SI, SK, TR),

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

ces voies incorporant chacune une boucle d'asservissement (telle 41,  $A_{gb}$ ,  $Bb_{cRi}$ ,  $R_{M_i}$ ) fournissant une tension de sortie (telle  $V_{-i}$ ) et un courant de mesure (tel  $i_{-i}$ ). Une tension de calibration, à des fréquences différentes des fréquences utiles des champs, est injectée dans les voies du capteur sans perturber la mesure continue par des voies d'acquisition de mesure ( $G_{-i}$ ), alors qu'un courant de calibration ( $i_{-i}$ ) est superposé sur les résistances de mesure. On peut ainsi identifier les composants variables du système et corriger les mesures par l'inverse des fonctions de transfert respectives des voies du capteur. L'invention s'applique notamment aux viseurs de casque.

**PROCEDE ET DISPOSITIF DE MESURE MAGNETIQUE  
DE LA POSITION ET DE L'ORIENTATION  
D'UN OBJET MOBILE PAR RAPPORT  
A UNE STRUCTURE FIXE**

5

La présente invention se rapporte à la mesure précise de champs magnétiques et plus particulièrement à la détermination de la position et de l'orientation d'un objet mobile par rapport à une structure fixe.

Notamment, l'invention concerne la détermination de la posture du casque d'un pilote d'aéronefs militaires, dans lesquels la position angulaire d'une cible est déterminée par la visée, au travers d'un système comprenant le visuel de casque du pilote.

Le fonctionnement d'un tel système est rappelé brièvement ci-après : par un dispositif collimateur annexe, le pilote voit, à travers sa visière semi-réfléchissante solidaire du casque, sur l'axe de vision, l'image d'un réticule projeté à l'infini en superposition avec la scène extérieure. Lorsqu'il veut désigner une cible, le pilote amène ce réticule à coïncider avec la cible et signale que la coïncidence est réalisée, au moyen par exemple d'une commande par bouton-poussoir, prévue à cet effet.

A condition de repérer, au moment de la signalisation de la coïncidence, la position angulaire exacte du casque, il est possible de déterminer, par rapport à l'avion, la direction de visée et de désigner l'objectif à un système d'arme, ou de pointer dans cette direction un système optique par exemple.

Un dispositif de mesure d'orientation et de position du casque du pilote dans un repère lié à l'aéronef peut consister en un capteur d'orientation et de position constitué de trois bobines électromagnétiques orthogonales et placé sur le casque, et en un émetteur, situé en un point fixe de la cabine, et constitué de trois autres bobines électromagnétiques.

Le procédé consiste alors à faire passer, dans chaque bobine de l'émetteur (formant un trièdre sensiblement orthogonal fixe), un courant électrique. Ces courants font apparaître trois champs magnétiques qui sont captés par les bobines du capteur (formant un trièdre mobile sensiblement orthogonal lié au casque). L'analyse de ces champs magnétiques permet de

déterminer la position et l'orientation du trièdre mobile par rapport au trièdre fixe.

Dans ce domaine d'application notamment il est impératif d'obtenir une mesure précise des champs magnétiques émis par l'émetteur fixe, et  
5 détectés par le capteur lié au casque, de manière à désigner avec précision, à un système d'arme, l'objectif sélectionné par le pilote.

Jusqu'à présent, on utilisait pour cette mesure des composants de grande précision, parfois thermostatés, pouvant fonctionner dans une large durée temporelle.

10 Un inconvénient de cette technique de l'art antérieur est que, même avec des composants de grande qualité et donc de complexité et de coût très élevés, il est difficile d'atteindre la très grande précision que nécessite ce domaine d'application.

Un autre inconvénient de cette technique de l'art antérieur est que,  
15 même avec des composants de grande qualité et de coût très élevé, il est difficile de maintenir un niveau de précision élevé dans le temps, à cause du vieillissement des composants.

Des techniques de calibration ont été proposées, pour limiter ces inconvénients. Toutefois, les phases de calibration supposent, selon ces  
20 techniques, l'interruption temporaire de l'émission, et donc du fonctionnement du capteur. Cette interruption n'est pas acceptable dans de nombreuses situations (diminution du rapport signal à bruit), et notamment dans le cas discuté ci-dessus d'équipements militaires, où le rapport signal à bruit doit être optimisé impérativement pour ainsi obtenir la précision  
25 maximale.

La demanderesse a imaginé une technique de calibration beaucoup plus avantageuse grâce à laquelle la mesure de champ magnétique peut fonctionner de manière continue et ne nécessite pas de phase préliminaire et/ou périodique de calibration pendant laquelle la mesure  
30 serait interrompue.

Dans un dispositif de mesure de champ magnétique comprenant au moins une chaîne d'acquisition de mesure, on prévoit selon cette technique de mettre en œuvre des signaux de calibration qui se superposent aux signaux à mesurer et qui présentent des composantes spectrales à des  
35 fréquences distinctes de celles des signaux utiles. On peut ainsi facilement

calculer une estimation d'une grandeur électrique représentative de la chaîne de mesure, à partir des paramètres de calibration, sans interruption de la mesure, de manière à éliminer les incertitudes de mesure et/ou la dépendance de la mesure à des paramètres lentement variables, connus  
 5 avec une précision insuffisante ou inconnus, comme par exemple les résistances de mesure de courant et les fonctions de transfert de chaînes de mesure. On choisit de préférence, comme grandeur électrique représentative, la fonction de transfert ou la tension de sortie de calibration de la chaîne.

10 Cependant, cette technique ne prend en compte que la calibration des chaînes d'acquisition de mesure mais pas la calibration des fonctions de transfert des voies du capteur.

L'invention a donc pour objet un procédé et un dispositif de mesure magnétique mettant en œuvre une calibration complète permettant  
 15 de connaître avec précision l'amplitude complexe des champs magnétiques à mesurer.

De manière générale, si l'on désigne par  $[\bar{B}_c(j\omega)]$  les champs résultant dans le repère capteur des champs émis par l'émetteur, les mesures en sortie des voies du capteur peuvent s'écrire :

20 
$$[\bar{M}(j\omega)] = T(j\omega) [\bar{B}_c(j\omega)]$$

où  $\omega$  représente en fait un ensemble de termes fréquentiels distincts entre eux et multiples entiers d'un terme  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_{obs}}$  (avec  $T_{obs}$  durée d'un cycle de mesure), respectivement émis par les voies d'émission et où  $T(j\omega)$  est une matrice dont les termes représentent les fonctions de transfert entre sorties  
 25 et entrées du capteur. Les termes diagonaux de  $T(j\omega)$  sont donc les fonctions de transfert de chaque voie du capteur et les termes hors diagonale représentent les termes de couplage entre voies. Ces termes hors diagonale sont faibles par construction du capteur et seront négligés dans la description ultérieure de l'invention bien que le procédé puisse s'appliquer de la même  
 30 façon.

Pour pouvoir modéliser avec précision  $[\bar{B}_c(j\omega)]$ , il faut donc connaître avec précision les termes complexes de la matrice  $T(j\omega)$  en fonction de la pulsation, en amplitude et en phase.

L'invention a pour objet un procédé et un dispositif dont le principe repose sur l'injection de signaux de calibration en superposition des signaux utiles, qui ne modifient pas l'estimation de ces signaux utiles et qui soient parfaitement discernables et mesurés sans erreur, puis sur l'identification de la fonction de transfert du capteur afin de corriger les mesures par l'inverse de la fonction de transfert complexe de la voie correspondante.

Selon l'invention, il est donc prévu un procédé de mesure magnétique de la position et de l'orientation d'un objet mobile par rapport à une structure fixe, dans lequel un premier ensemble émetteur inclut au moins deux bobines orthogonales d'émission de champs magnétiques, solidaires de ladite structure fixe, qui définissent un repère de référence, et des moyens d'émission pour injecter dans lesdites bobines des courants d'émission prédéterminés à des premières fréquences, dans lequel un second ensemble capteur inclut au moins deux bobines orthogonales de détection de champs magnétiques, solidaires dudit objet mobile, des voies de capteurs à boucles d'asservissement pour produire dans des bobines de contre-réaction couplées auxdites bobines de détection des champs magnétiques de contre-réaction par injection de courants de mesure et une voie de calibration pour élaborer au moins une tension de calibration, et dans lequel au moins une voie d'acquisition est prévue pour extraire des valeurs de mesure desdites voies d'émission, desdites voies de capteurs et de ladite voie de calibration et des moyens de calcul et de traitement estiment, à partir desdites valeurs de mesure, les champs magnétiques détectés dans le second ensemble capteur et en déduisent la position et l'orientation dudit objet mobile dans ledit repère de référence, ledit procédé étant caractérisé en ce que ladite tension de calibration ne comporte que des termes à au moins deux fréquences distinctes desdites premières fréquences et en ce que ledit procédé comprend une étape d'injection de tensions et courants de calibration dans lesdites voies du capteur pour produire des valeurs de mesure de calibration identifiées par leur fréquence, une étape d'estimation par les moyens de calcul de la fonction de transfert de chacune des voies de capteur et une étape de déduction par lesdits moyens de calcul des champs magnétiques détectés à partir desdites valeurs de mesure et de l'inverse desdites fonctions de transfert estimées.

L'invention prévoit également un tel procédé dans lequel les boucles d'asservissement des voies de capteur fournissent des tensions de sortie produisant lesdits courants de mesure et lesdits courants de mesure s'écoulent à travers des résistances de mesure pour fournir des tensions de mesure, caractérisé en ce que l'on superpose la tension de calibration auxdites tensions de sortie pour la production desdits courants de mesure, et en ce que ladite étape d'estimation des fonctions de transfert s'effectue, à partir de la séparation des termes fréquentiels de calibration dans lesdites tensions de sortie, par approximation polynomiale pour lesdites premières fréquences.

Selon un autre aspect de l'invention, il est prévu un dispositif de mesure magnétique de la position et de l'orientation d'un objet mobile par rapport à une structure fixe, du type comprenant :

- 15       - un premier ensemble émetteur incluant au moins deux bobines orthogonales d'émission de champs magnétiques, solidaires de ladite structure fixe et définissant un repère de référence, et des moyens d'émission pour injecter dans lesdites bobines des courants prédéterminés à des premières fréquences et  
20       constituer avec lesdites bobines au moins deux voies d'émission ;
- un second ensemble capteur incluant au moins deux bobines orthogonales de détection de champs magnétiques, solidaires dudit objet mobile, des moyens de mesure par boucles d'asservissement, pour produire dans des bobines de  
25       contre-réaction couplées auxdites bobines de détection des champs magnétiques de contre-réaction par injection de courants de mesure et pour constituer avec lesdites bobines de détection au moins deux voies de capteur, et des moyens  
30       de calibration comprenant une voie de calibration pour élaborer au moins une tension de calibration à des secondes fréquences ;
- au moins une voie d'acquisition de mesures pour extraire des valeurs de mesure desdites voies d'émission, desdites voies de capteur et de ladite voie de calibration ; et  
35

- des moyens de calcul et de traitement pour estimer, à partir desdites valeurs de mesure, les champs magnétiques détectés dans le second ensemble capteur et en déduire la position et l'orientation dudit objet mobile dans ledit repère de référence,
- 5 caractérisé en ce que lesdites secondes fréquences sont distinctes desdites premières fréquences, en ce que lesdits moyens de calibration sont prévus pour injecter des tensions et courants de calibration dans lesdites voies de capteur pour produire des valeurs de mesure de calibration identifiées par leurs fréquences et adressées auxdits moyens de calcul par la ou lesdites
- 10 voies d'acquisition et en ce que lesdits moyens de calcul et de traitement sont prévus pour estimer la fonction de transfert de chacune des voies de capteur et déduire les champs magnétiques détectés desdites valeurs de mesure et de l'inverse desdites fonctions de transfert estimées.

15 L'invention sera mieux comprise et d'autres caractéristiques et avantages apparaîtront à l'aide de la description ci-après et des dessins joints où :

- la Figure 1 est un schéma de principe d'un dispositif du type mis en œuvre dans un viseur de casque ;
- 20
- la Figure 2 est un schéma synoptique de l'architecture d'un tel dispositif adapté à un environnement magnétique perturbé ;
  - la Figure 3 est un schéma explicatif de principe d'une voie de capteur selon l'invention ;
- 25
- la Figure 4 est une représentation de la voie de la Figure 3 en utilisant les transformées de Laplace ;
  - la Figure 5 est un schéma simplifié du capteur selon l'invention en ne considérant que la détermination de la fonction de transfert de chaque voie ;
- 30
- la Figure 6 est un schéma prenant en compte en outre l'identification des composants variables du capteur ; et
  - la Figure 7 est le schéma d'un mode de réalisation pratique d'un dispositif de mesure magnétique selon l'invention.

Comme on l'a brièvement expliqué ci-dessus, l'invention concerne

35 la mesure magnétique précise de la position et de l'orientation d'un objet



mobile par rapport à une structure fixe. La Figure 1 est un schéma de principe d'un tel dispositif.

Son objet consiste à déterminer la position et l'orientation d'un capteur magnétique 11 dans le repère orthonormé  $[R]_E$  12 formé par les 3 bobines d'un émetteur 1 de champ magnétique  $\vec{B}_E(\vec{x})$ . On notera que, par souci de clarté et de simplification, seule une bobine d'émission a été représentée sur la Figure 1. La généralisation à trois bobines est immédiate.

Au point  $\vec{x}$ , qui indique la position du capteur 11 dans le repère  $[R]_E$ , l'induction  $\vec{B}_E(\vec{x})$  se projette sur les 3 axes des bobines de détection et de contre-réaction 13 du capteur. Les courants de contre-réaction  $i_{c1}, i_{c2}, i_{c3}$  mis en œuvre dans le capteur 11 annulent ces projections, par un procédé d'asservissement connu de l'homme du métier.  $i_{c1}, i_{c2}, i_{c3}$  représentent donc les mesures d'induction magnétique selon les directions des axes du capteur.

En effet, pour une émission sur une seule bobine telle que représentée sur la Figure 1, il est connu qu'en un point  $\vec{x}$  de l'espace, pour un émetteur orthonormé et un capteur orthonormé, le capteur 11 mesure :

$$\begin{pmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{pmatrix} = k [R'_{C/E}] \begin{pmatrix} f_1(\vec{x}) \\ f_2(\vec{x}) \\ f_3(\vec{x}) \end{pmatrix} i_E \quad (1)$$

20

où  $R'_{C/E}$  est la matrice transposée de la matrice de passage du référentiel émetteur vers le référentiel capteur, formée des vecteurs unitaires des axes capteur exprimés dans le référentiel émetteur, et k un terme de proportionnalité dépendant des unités choisies,  $f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), f_3(\vec{x})$  étant les composantes de  $\vec{B}_E(\vec{x})$  au point  $\vec{x}$  dans le référentiel 12  $[R]_E$  formé par l'émetteur 1 pour un courant d'émission unité.

En faisant les rapports  $\frac{i_{c1}}{i_E}, \frac{i_{c2}}{i_E}, \frac{i_{c3}}{i_E}$  (où  $i_E$  est le courant d'émission), il ne reste que l'information de position  $\vec{x}$  et de rotation X, Y, Z du capteur 11 dans l'expression de la mesure (1) ci-dessus. Dans le cas plus général de trois émissions selon les trois axes de l'émetteur, l'obtention de la matrice 3x3 de terme générique  $i_{ci}/i_{Ej}$ , où  $i$  et  $j$  sont des indices de valeur 1

30

à 3, donne donc aisément accès à l'orientation et à la position du capteur 11 dans le référentiel 12 de l'émetteur 1.

La Figure 2 illustre l'architecture de principe d'un dispositif tel que décrit ci-dessus. On considère le cas général d'une utilisation dans un environnement de perturbations magnétiques dues par exemple à la présence de corps conducteurs et/ou de corps de type ferromagnétique.

Un bloc 1 de génération des signaux est constitué de trois voies  $1_1$  à  $1_3$ . Chaque voie  $1_1$  à  $1_3$  comprend un générateur  $11_1$  à  $11_3$  de courant  $i_{B1}$  à  $i_{B3}$ , une bobine  $12_1$  à  $12_3$  et une résistance  $13_1$  à  $13_3$ . Le passage du courant dans les bobines  $12_1$  à  $12_3$  permet la création d'un champ magnétique  $B_1$  à  $B_3$  respectivement pour chacune des voies  $1_1$  à  $1_3$ . Les courants  $i_{B1}$  à  $i_{B3}$  injectés dans les bobines  $12_1$  à  $12_3$  sont préférentiellement produits par des générateurs de courant d'impédance interne supérieure à 500k $\Omega$ . Selon un mode de réalisation préférentiel, les générateurs de courant  $11_1$  à  $11_3$  sont connectés à des bobines non accordées. L'invention s'applique bien sûr également au cas où les générateurs de courant  $11_1$  à  $11_3$  sont connectés à des bobines accordées.

Des perturbations magnétiques, qui prennent naissance dans les matériaux ferromagnétiques et/ou les matériaux conducteurs environnant le dispositif de viseur de casque illustré sur la Figure 1, se superposent aux champs  $B_1$  à  $B_3$  sous la forme de champs magnétiques perturbateurs  $B_{p1}$  à  $B_{p3}$ .

Le capteur 14 reçoit la somme des champs  $B_1$  à  $B_3$  émis respectivement par les voies  $1_1$  à  $1_3$  du bloc de génération des signaux 1, des champs perturbateurs  $B_{p1}$  à  $B_{p3}$ , et d'éventuelles perturbations rayonnées  $B_r$ .

Un bloc 16 de calibration du capteur délivre les signaux de calibration  $V_{1cal}$ ,  $V_{2cal}$ ,  $V_{3cal}$ .

A l'issue des différents traitements appliqués aux champs reçus, le bloc 20 délivre en sortie la matrice  $C_{ij}$  des couplages émetteur-capteur en espace libre, qui permet de calculer de façon connue la position et l'orientation du capteur 14 dans le repère de l'émetteur 1 du dispositif de viseur de casque.

Le bloc 20 permet :

- de séparer et mesurer les grandeurs électriques (tensions et courants) de mesure et de calibration grâce au fait qu'elles sont disjointes en fréquence ;
- de modéliser les champs reçus par des techniques itératives ;
- 5 - d'identifier les champs constants avec la fréquence permettant d'estimer le champ magnétique émis en espace libre en éliminant les champs perturbateurs ;
- d'estimer la position et l'orientation du viseur de casque portant le capteur.

10

La Figure 3 est un schéma explicatif plus détaillé du principe d'une voie de capteur du dispositif selon l'invention.

On veut mesurer au niveau du capteur l'induction magnétique  $B_{ext}$  ambiante. Pour cela, on utilise, pour chaque voie, une bobine de détection  $Bb_d$  bobinée en même temps qu'une bobine de contre-réaction  $Bb_{CR}$  associée autour d'un noyau 21 commun en matériau magnétique très perméable  $\left(\frac{\mu}{\mu_0} \gg 1\right)$ . On sait que l'induction magnétique est liée au champ magnétique par la relation  $B_{ext} = \mu H_{ext}$ . Aux bornes de la bobine de détection  $Bb_d$ , on mesure la variation de flux :

20

$$e = - \frac{d\phi}{dt} = - N_d S_d \frac{d(B_{ext} - B_{CR})}{dt}$$

où  $N_d$  et  $S_d$  représentent le nombre de spires et leur surface moyenne. Cette mesure s'effectue à l'aide d'une boucle d'asservissement comprenant un amplificateur 22 de fonction de transfert  $KA(j\omega)$  recevant la tension  $e$  prélevée aux bornes d'une capacité C rajoutée pour diminuer fortement le facteur de surtension propre de la bobine de détection, un réseau correcteur 23 permettant de stabiliser la boucle d'asservissement, un amplificateur 24 de gain  $A_2$ , et un générateur de courant 25 avec une résistance pure constante  $R_s$  qui fixe le coefficient de transfert tension/courant à l'amplificateur 24. Le générateur de courant 25 génère le courant  $i_c$  de contre-réaction qui est injecté dans la bobine de contre-réaction  $Bb_{CR}$ . Ce courant  $i_c$  est envoyé vers la masse à travers une résistance de mesure  $R_M$ . Sur la borne 27, on trouve une tension de mesure  $V'_c$  représentant la valeur

du courant de mesure  $i_c$ . Enfin, selon une caractéristique de l'invention, on superpose une tension de calibration  $-V_{cal}$ , appliquée à la borne 26, à la tension de sortie  $V_c$  de la voie de capteur, présente à l'entrée de l'amplificateur 24.

- 5 L'induction magnétique de contre-réaction  $B_{CR}$ , produite par l'injection du courant  $i_c$ , dans la bobine  $Bb_{CR}$  s'écrit :

$$B_{CR} = N_{CR} \mu k_B i_c = \mu k_{CR} i_c$$

- 10 où  $N_{CR}$  est le nombre de tours par unité de longueur et  $k_B$  est une constante dépendant des unités utilisées, avec par définition  $H_{CR} = \frac{B_{CR}}{\mu} = k_{CR} i_c$ .

Si l'asservissement opère correctement, on a  $B_{ext} \equiv B_{CR}$  et la tension  $\underline{e}$  tend vers zéro.

- On a représenté sur la Figure 4 le schéma de la voie de la  
 15 Figure 3 en utilisant les transformées de Laplace des variables temporelles pour passer aux fonctions de transfert. Pour déterminer la fonction de transfert en fonction de la pulsation, il suffit de faire  $p = j\omega$ . Dans cette représentation,  $K$  est un gain statique constant proportionnel au produit  $N_d S_d \mu(p)$ .  $A_2(p)$  est le gain complexe de l'amplificateur 24. En fonction  
 20 de la qualité et donc du coût de cet amplificateur, le gain peut être constant dans toute la bande de fonctionnement en fonction de  $\omega$ , constant en fonction de l'environnement ou bien non constant.

- Comme on l'a vu dans l'introduction, il est nécessaire de connaître avec précision les fonctions de transfert complexes de chacune des voies du  
 25 capteur pour obtenir les valeurs  $H_{ext}$  qui sont les entrées que l'on cherche à mesurer. La tension  $V_{cal}$  est une entrée secondaire que l'on a rajoutée pour calibrer le système selon l'invention.

En posant :

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= A(j\omega) C(j\omega) \\ 30 \quad R(j\omega) &= k_{CR} \frac{A_2(j\omega)}{R_s} \end{aligned}$$

on obtient :

$$T_v(j\omega) = \frac{KGR}{1 + KGR}$$

Or, on peut écrire :

$$V_c(j\omega) = -T_v(j\omega)V_{cal}(j\omega) + T_v(j\omega)\left(\frac{H_{ex}(j\omega)}{R(j\omega)}\right) \quad (a)$$

$$V'_c(j\omega) = R_M \left[ (1 - T_v(j\omega)) \frac{A_2(j\omega)}{R_s} V_{cal}(j\omega) + T_v(j\omega) \left( \frac{H_{ex}(j\omega)}{k_{CR}} \right) \right] \quad (b)$$

Comme on peut le constater, grâce à la superposition de signaux  
 5 de calibration  $V_{cal}(j\omega_{cal})$  à des pulsations  $\omega_{cal}$  différentes des pulsations  $\omega_u$   
 des signaux utiles de  $H_{ex}(j\omega_u)$  émises par l'émetteur, on peut séparer les  
 termes fréquentiels (par exemple par FFT, en anglais « Fast Fourier  
 Transform », ou par détection synchrone) et obtenir la mesure de la fonction  
 de transfert  $T_v(j\omega)$ . En effet, à partir de l'équation (a) en isolant les termes  
 10 de pulsation  $\omega_{cal}$ , on a :

$$V_c(j\omega_{cal}) = -T_v(j\omega_{cal})V_{cal}(j\omega_{cal})$$

On peut alors identifier la valeur estimée de  $T_v$  :

15

$$\widehat{T_v(j\omega)} = F(V_c(j\omega_{cal}), V_{cal}(j\omega_{cal}), j\omega)$$

où F indique un modèle d'interpolation tel qu'une approximation polynomiale.

20

A partir de cette valeur estimée, on peut isoler dans la relation (a)  
 pour les pulsations  $\omega_u$  :

$$V_c(j\omega_u) = \widehat{T_v(j\omega_u)} \frac{H_{ex}(j\omega_u)}{R(j\omega_u)}$$

25

$$\text{d'où : } \widehat{H_{ex}(j\omega_u)} = R(j\omega_u) \frac{V_c(j\omega_u)}{\widehat{T_v(j\omega_u)}}$$

Le problème qui se pose alors est que le terme  
 $R(j\omega_u) = \frac{k_{CR} A_2(j\omega_u)}{R_s}$  n'est pas identifié. En effet,  $k_{CR}$  est considéré comme

constant et identifiable en usine car, homogène à un nombre de tours par  
 30 unité de longueur, il est invariable dans le temps et indépendant de la

température et des conditions d'environnement. Par contre, ce n'est le cas ni de la résistance  $R_s$ , ni du gain  $A_2$ . Or, ces composants conditionnent la précision des paramètres que l'on cherche à mesurer.

- Il faut donc prévoir un dispositif à calibration adéquate pour  
5 déterminer ces composants dans chaque voie.

La Figure 5 illustre un schéma simplifié permettant d'identifier certains éléments importants de chaque voie du capteur.

- En utilisant les indices 1 à 3 pour les trois voies du capteur correspondant à trois bobines de détection orthogonales, on a schématisé  
10 l'ensemble amplificateur 22/correcteur 23 de la Figure 4 par un bloc, respectivement  $Dv_1$  à  $Dv_3$ , fournissant une tension de sortie  $V_{c1}$  à  $V_{c3}$ .  
L'ensemble 24 de la Figure 4 est schématisé par un amplificateur 241 à 243 de gain  $A_{21}(j\omega)$  à  $A_{23}(j\omega)$ , une résistance  $R_{s1}$  à  $R_{s3}$  et un générateur de courant fournissant le courant  $i_{c1}$  à  $i_{c3}$  de contre-réaction aux bobines de  
15 contre-réaction  $Bb_{CR1}$  à  $Bb_{CR3}$ . Une résistance de mesure  $R_M$  permet d'adresser la tension de mesure  $V'_{cal}$  à une voie d'acquisition incluant l'amplificateur 28 de gain  $A_E(j\omega)$  et qui fournit, après traitement, en sortie une valeur numérisée  $V'_{Ncal}$ . Une seconde entrée de l'amplificateur 28 soit est mise à la masse, soit reçoit une valeur de calibration  $V_{cal4}$ . Des tensions  
20 de calibration  $-V_{cal1}$  à  $-V_{cal3}$  sont appliquées aux entrées inverses des amplificateurs 241 à 243.

- En usine, on met à la masse les tensions de sortie  $V_{c1}$  à  $V_{c3}$ . En désignant par  $i$  l'indice des voies du capteur, on applique alternativement  
 $V_{cali} = V_{cal}(j\omega_{cal})$  sur l'entrée de chaque voie pendant que les entrées de  
25 calibration des autres voies sont à la masse. On a :

$$V'_{cal}(j\omega_{cal}) = R_M \left( \frac{V_{cali} \cdot A_{2i}(j\omega_{cal})}{R_{si}} \right)$$

- d'où on déduit  $\frac{R_M}{R_{si}} A_{2i}(j\omega)$  pour chaque voie. Mais si le gain  $A_{2i}(j\omega)$  varie  
30 dans des proportions gênantes, on doit alors faire appel à la combinaison des relations (a) et (b) ci-dessus. Comme déjà mentionné, (a) fournit  $\hat{I}_v(j\omega)$ . En effectuant la séparation fréquentielle des signaux selon la pulsation  $\omega_u$  ou  $\omega_{cal}$ , on dispose par la relation (b) de :

$$V'_c(j\omega_{cal}) = R_M (1 - T_v(j\omega_{cal})) \frac{A_2(j\omega_{cal})}{R_s} V_{cal}(j\omega_{cal})$$

d'où :

5

$$A_2(j\omega_{cal}) \frac{R_M}{R_s} = \frac{1}{1 - T_v(j\omega_{cal})} \frac{V'_c(j\omega_{cal})}{V_{cal}(j\omega_{cal})}$$

et comme :

$$10 \quad \widehat{T_v(j\omega_{cal})} = - \frac{V_c(j\omega_{cal})}{V_{cal}(j\omega_{cal})}$$

on obtient :

$$A_2(j\omega_{cal}) \frac{R_M}{R_s} = \frac{V'_c(j\omega_{cal})}{V_{cal}(j\omega_{cal}) - V_c(j\omega_{cal})}$$

15

On en déduit  $\widehat{A_2(j\omega) \frac{R_M}{R_s}}$  par approximation polynomiale de la même façon que pour  $\widehat{T_v(j\omega)}$ .

20 Cependant, cette solution permet de tenir compte du vieillissement dans le temps des composants impliqués, mais si les paramètres  $A_2$ ,  $R_M$ ,  $R_{si}$  varient pendant la mission en fonction de la température, cette solution impose d'arrêter les mesures pour effectuer la calibration ( $V_{ci}$  mis à la masse), ce qui est contraire au but recherché dans l'invention. On est donc conduit au schéma, conforme au principe de la Figure 3, décrit dans la

25 Figure 6 mais où  $i_{c1}$  à  $i_{c3}$  représentent la somme des courants l'un produit par la tension du capteur  $V_{ci}$  et l'autre par la tension de calibration. Dans ce schéma, la grandeur de sortie est la tension  $V'_{ci}$  au lieu de  $V_{ci}$ .

Si on considère que, dans chaque bobine d'émission d'indice  $j$  (avec  $j$  prenant les valeurs 1 à 3), circule un courant d'émission de pulsations  $\omega_{j,k_j}$  où  $k_j$  varie de  $K_j$  à  $K_j \max$ , toutes ces pulsations étant

30

distinctes entre elles et distinctes des pulsations  $\omega_{cal}$  de calibration, on peut écrire à partir de la relation (b) pour la voie de capteur  $i$  :

$$5 \quad V'_{ci}(j\omega_{j,k_j}) = R_{Mi} \left[ T_v(j\omega_{j,k_j}) \right] \frac{H_{exi}(j\omega_{j,k_j})}{k_{CR}}$$

soit :

$$V'_{ci}(j\omega_{j,k_j}) = \frac{R_{Mi}}{k_{CRi}} \left[ T_v(j\omega_{j,k_j}) \right] i_{Ej}(j\omega_{j,k_j}) H_{exi Norm}(j\omega_{j,k_j})$$

où :  $H_{exi Norm}$

10

est la valeur normalisée du champ émis pour un courant d'émission de 1 ampère.

Dans la suite de la description et pour simplifier on ne notera plus les pulsations  $\omega_{j,k_j}$  utiles mais on notera simplement  $\omega_u$  de même que l'on note  $\omega_{cal}$  pour les pulsations de calibration, étant entendu que toutes ces pulsations sont distinctes et séparables fréquentiellement.

15

Comme on le voit dans la dernière relation ci-dessus donnant  $V'_{ci}$ , on pourra connaître avec précision  $H_{exi Norm}$  à condition d'identifier  $R_{Mi}$  et  $i_{Ej}$ .

20

On se rapporte pour cela au schéma modifié de la Figure 6, où on retrouve, partiellement, les trois voies d'émission de l'émetteur et les trois voies de capteur. On a, en outre détaillé une voie de calibration et la voie d'acquisition commune. La voie de calibration comporte en série un convertisseur numérique-analogique  $CNA_{cal}$ , un échantillonneur bloqueur  $BI$  à la période  $T_E$ , un filtre 30 de fonction de transfert  $F_{cal}(j\omega)$  fournissant une tension de calibration  $V_{cal}$  à partir de la valeur numérique  $V_{calN}$ , l'ensemble de cette chaîne ayant une fonction de transfert  $G_{cal}(j\omega)$ . Un courant de calibration  $i_{cal}$  est fourni à partir de la tension  $V_{cal}$  à l'aide d'une résistance  $R_{cal}$  et d'un générateur de courant.

25

La voie d'acquisition, de fonction de transfert  $G_{acq}(j\omega)$ , comprend un amplificateur 28 de gain  $A_E$ , un bloqueur  $BI$  et un convertisseur analogique/numérique  $CAN_E$  pour fournir une valeur de tension numérique de mesure  $V_{EN}$ . L'entrée directe de l'amplificateur 28 est relié par un commutateur 32 à l'un des contacts 1 à 4, permettant de relier en multiplex la

30



voie d'acquisition à la tension de mesure d'une des trois voies de capteur ou de la somme des trois voies d'émission. L'entrée inverse de l'amplificateur 28 est reliée par un commutateur 33 soit à la masse 6, soit par le contact 5 à la tension de calibration  $V_{cal}$ . En connectant l'amplificateur 28 seulement à la

5 masse par le contact 6, on peut mesurer le bruit propre de la chaîne d'acquisition.

Après un cycle de calibration où on injecte  $V_{cal}$  par le contact 5, puis où on injecte séquentiellement le courant  $i_{cal}$  sur les résistances de mesure  $R_{M1}$  à  $R_{M3}$  et  $R_E$ , on dispose des mesures suivantes :

10

$$V_{EN}^{(5)}(j\omega) = G_{acq}(j\omega) G_{cal}(j\omega) V_{calN}(j\omega) \quad (c)$$

$$V_{EN}^4(j\omega) = G_{acq}(j\omega) R_E \left[ i_{E1}(j\omega_{u1}) + i_{E2}(j\omega_{u2}) + i_{E3}(j\omega_{u3}) + G_{cal}(j\omega_{cal}) \frac{V_{calN}(j\omega_{cal})}{R_{cal}} \right] \quad (d)$$

15

$$V_{EN1}^{(1)}(j\omega) = G_{acq}(j\omega) R_{M1} \left[ i_{c1} + G_{cal}(j\omega_{cal}) \frac{V_{calN}(j\omega_{cal})}{R_{cal}} \right] \quad (e.1)$$

$$V_{EN2}^2(j\omega) = G_{acq}(j\omega) R_{M2} \left[ i_{c2} + G_{cal}(j\omega_{cal}) \frac{V_{calN}(j\omega_{cal})}{R_{cal}} \right] \quad (e.2)$$

$$V_{EN3}^3(j\omega) = G_{acq}(j\omega) R_{M3} \left[ i_{c3} + G_{cal}(j\omega_{cal}) \frac{V_{calN}(j\omega_{cal})}{R_{cal}} \right] \quad (e.3)$$

20

Il est clair que les courants  $i_{c1}$ ,  $i_{c2}$  et  $i_{c3}$  contiennent toutes les composantes aux pulsations  $\omega_{1,k_1}$  à  $\omega_{3,k_3}$  distinctes entre elles et distinctes des composantes aux pulsations  $\omega_{cal}$ . On peut donc les séparer entre elles. Ainsi le

25 deuxième membre de l'équation (d) peut se subdiviser en deux termes  $G_{acq}(j\omega_u) R_E \sum_j i_{Ej}(j\omega_{uj})$ , qu'on désignera par  $V_{EN1}^{(4)}$ , et

$$G_{acq}(j\omega_{cal}) R_E G_{cal}(j\omega_{cal}) \left[ \frac{V_{calN}(j\omega_{cal})}{R_{cal}} \right] \text{ qu'on désignera par } V_{ENcal}^{(4)}.$$

Les mêmes notations seront utilisées pour les relations (e.1) à (e.3) qui s'écriront avec deux termes  $V_{ENi1}^{(i)}$  et  $V_{ENcal}^{(i)}$ .

Enfin la relation (c) n'aura qu'un seul terme écrit  $V_{ENcal}^{(5)}$ .

On déduit facilement de toutes ces relations que :

$$\begin{aligned} \frac{R_E}{R_{cal}} &= \frac{V_{ENcal}^{(4)}}{V_{ENcal}^{(5)}} & \frac{R_{M1}}{R_{cal}} &= \frac{V_{EN1cal}^{(1)}}{V_{ENcal}^{(5)}} \\ 5 \quad \frac{R_{M2}}{R_{cal}} &= \frac{V_{EN2cal}^{(2)}}{V_{ENcal}^{(5)}} & \frac{R_{M3}}{R_{cal}} &= \frac{V_{EN3cal}^{(3)}}{V_{ENcal}^{(5)}} \end{aligned}$$

d'où :

$$\frac{R_{M1}}{R_E} = \frac{V_{EN1cal}^{(1)}}{V_{ENcal}^{(4)}} \quad (f)$$

10 et des relations semblables pour  $\frac{R_{M2}}{R_E}$  et  $\frac{R_{M3}}{R_E}$ .

Comme on l'a vu, pour  $\omega_{ij}$  :

$$V_{ENil}^{(i)} = G_{ucq} R_{Mi} i_{ci}$$

15

Or de (b), on tire, toujours pour  $\omega_{ij}$  :

$$i_{ci} = \widehat{T_{vi}} \frac{H_{ext i}}{k_{CRI}}$$

20 soit :

$$V_{ENil}^{(i)} = G_{ucq} R_{Mi} \frac{i_{Ej}}{k_{CRI}} H_{ext i Norm} \widehat{T_{vi}} \quad (g)$$

De la relation (d) pour  $\omega_{ij}$ , on obtient :

$$25 \quad V_{ENI}^{(4)} = G_{ucq} R_E i_{Ej} \quad (h)$$

En combinant (g) et (h), on a :

$$V_{ENi}^{(i)} = \frac{\widehat{R_{Mi}}}{R_E} \frac{V_{ENi}^{(4)}}{k_{CRi}} \widehat{T_{vi}} H_{ext i Norm} \quad (i)$$

les rapports  $\frac{R_{Mi}}{R_E}$  sont identifiés par les relations (f), d'où :

$$5 \quad V_{ENi}^{(i)}(j\omega_{uj}) = \left( \frac{V_{ENicul}^{(i)}}{V_{ENicul}^{(4)}} \right) \frac{V_{ENi}^{(4)}(j\omega_{uj})}{k_{CRi}} \widehat{T_{vi}}(j\omega_{uj}) H_{ext i Norm} \quad (j)$$

Ces termes  $V_{ENi}^{(i)}(j\omega_{uj})$  forment une matrice à neuf termes, qui ne dépendent que de  $k_{CRi}$  puisque tous les autres facteurs sont identifiés. En fait,  $k_{CRi}$  peut être considéré comme invariable pour les trois voies du capteur.

10 On tire donc de la relation (j) l'expression des sorties désirées :

$$H_{ext i}(j\omega_{uj}) = A^{-1} B^{-1} \widehat{T_{vi}^{-1}}(j\omega_{uj}) \quad (k)$$

avec  $T_v^{-1} = \frac{1}{\rho_T} e^{-j\phi_T}$  si on écrit  $T_v$  sous la forme complexe classique

$$15 \quad T_v(j\omega) = \rho_T(j\omega) e^{j\phi_T(j\omega)}$$

$$A^{-1} = \frac{V_{ENicul}^{(4)}}{V_{ENicul}^{(i)}} \text{ constante en fréquence}$$

$$20 \quad B^{-1} = k_{CRi} \frac{1}{\rho_j} e^{-j\phi_j}$$

$$\text{si } V_{ENi}^{(4)}(j\omega_{uj}) = \rho_j(j\omega_{uj}) e^{j\phi_j(j\omega_{uj})}$$

Ainsi, la relation finale (k) montre que l'on a bien compensé la  
25 mesure du champ magnétique à l'aide de l'inverse de la fonction de transfert de la voie du capteur.

La réalisation de la Figure 6 que l'on vient d'analyser est basée sur l'utilisation d'une voie d'acquisition unique pour toutes les mesures, ce qui a un avantage évident de simplicité.

Cependant, cela suppose son utilisation selon un échantillonnage séquencé avec une période  $T'_E$  telle que :

$$T'_E = \frac{T_E}{N_a}$$

5

où  $N_a$  est le nombre de voies différentes à acquérir pendant la période  $T_E$ .

Si le temps de réponse de  $G_{acq}(j\omega)$  est trop long par rapport à  $T'_E$ , il faudra alors adopter le schéma du mode de réalisation de la Figure 7.

Sur cette Figure 7, on doit prévoir quatre voies d'acquisition avec  
10 amplification/filtrage :

- trois voies d'acquisition des courants de mesure  $i_{ci}$  opérant avec la période  $T_E$  de façon continue (s'il est suffisamment rapide, on peut n'utiliser qu'un seul convertisseur CAN multiplexant les trois voies filtrées et échantillonnées/bloquées au même instant) ;
- 15 - une voie d'acquisition multiplexée opérant seulement sur la calibration à une cadence faible, ce qui n'est pas gênant pour identifier des paramètres lentement variables.

Les trois voies de capteurs comprennent donc chacune, comme déjà  
20 décrit, une bobine de détection,  $Bb_{d1}$  à  $Bb_{d3}$ , un ensemble amplificateur/correcteur, 41 à 43, fournissant la tension de sortie  $V_{c1}$  à  $V_{c3}$ , un amplificateur  $A_{21}$  à  $A_{23}$  recevant la tension de sortie sur une entrée et la tension de calibration via un commutateur 44 à 46 sur l'autre entrée, un générateur de courant de contre-réaction  $i_{c1}$  à  $i_{c3}$ , une bobine de contre-réaction  $Bb_{CR1}$  à  $Bb_{CR3}$   
25 et une résistance  $R_{M1}$  à  $R_{M3}$  de mesure du courant de contre-réaction sur lequel on peut superposer le courant de calibration  $i_{cal}$  via un commutateur 51 à 53. A chacune des voies du capteur correspond une voie d'acquisition de mesure  $G_{acq1}$  à  $G_{acq3}$  comprenant un amplificateur  $A_{m1}$  à  $A_{m3}$ , un filtre  $F_1(j\omega)$  à  $F_3(j\omega)$ , un bloqueur  $Bl$  et un convertisseur analogique/numérique CAN pour fournir la  
30 tension de mesure numérisée  $V'_{c1N}$  à  $V'_{c3N}$ . Par ailleurs, les voies émetteur partiellement représentées sont connectées pour envoyer les courants d'émission  $i_{E1}$  à  $i_{E3}$  sur une résistance de mesure  $R_E$  sur laquelle on peut aussi superposer le courant de calibration par le commutateur 54, cette résistance étant reliée au contact 4 d'un commutateur 55. Ce commutateur 55 permet de

relier l'entrée d'une quatrième voie d'acquisition, multiplexée mais semblable par ailleurs aux trois premières voies, aux tensions de mesure sur les résistances de mesure par les contacts 1 à 4, à la tension de calibration par le contact 5, à la masse par le contact 6 et aux tensions de sortie des trois voies de capteur par le contact 7 et le commutateur 56.

Toutes les valeurs de mesure numérisées sont envoyées à un processeur 60 de traitement qui effectue les diverses opérations de mesure et calibration et de séparation fréquentielle mentionnées dans les relations ci-dessus et en déduit la position et l'orientation P/O du capteur, tout en fournissant les signaux de contrôle  $Ctl$  nécessaires au fonctionnement de l'ensemble ainsi que la valeur de calibration  $V_{calN}$  et les périodes  $T_E$  et  $T'_E$ .

Ainsi, on peut voir que, par l'intermédiaire du commutateur 56, de la voie d'acquisition  $G_{acq4}$  et des contacts 7 et 5 de 55, on peut déterminer  $\hat{T}_{v1}$ ,  $\hat{T}_{v2}$  et  $\hat{T}_{v3}$  selon la relation (a). D'autre part, la voie d'acquisition  $G_{acq4}$  permet de calibrer, selon la relation (f), les valeurs  $\frac{R_{M1}}{R_E}$  à  $\frac{R_{M3}}{R_E}$ . Les cycles

d'acquisition et de calibration ci-dessus sont indépendants des cycles de la mesure continue des courants circulant dans  $R_{M1}$  à  $R_{M3}$  par les trois premières voies.

Par rapport à la figure 6, on constate qu'il existe trois voies d'acquisition  $G_{acqi}$  i de 1 à 3, distinctes entre elles et différentes aussi de la voie de calibration  $G_{acq4}$ . On montre ci après que la configuration de la figure 7 résout complètement le problème posé. Les différentes équations disponibles sont les suivantes :

➤ calibration :

- commutateur 55, mesures (1), (2), (3), (4) :

$$V_{ENcal}^{(4)} = \frac{R_E}{R_{cal}} G_{acq4} V_{cal} \quad (l)$$

$$V_{ENcal}^{(i)} = \frac{R_{Mi}}{R_{cal}} G_{acq4} V_{cal} \text{ pour } i=1 \text{ à } 3 \quad (m)$$

On en déduit :

$$\frac{R_{Mi}}{R_E} = \frac{V_{ENcal}^{(i)}}{V_{ENcal}^{(4)}} \text{ pour } \omega = \omega_{cal}$$

- mesures des voies  $V'_{ciN}$

$$V'_{ciNcal} = G_{acq i} \frac{R_{Mi}}{R_{cal}} V_{cal} \text{ pour } i=1 \text{ à } 3 \quad (n)$$

5 Combinant (m) et (n) on obtient :

$$\frac{G_{acq i}}{G_{acq 4}} = \frac{V'_{ciNcal}}{V_{ENcal}^{(i)}} \text{ pour } \omega = \omega_{cal} \quad (o)$$

De ces expressions, on en déduit les estimations par des  
10 fonctions d'approximation dans le domaine des fréquences comme décrit précédemment pour :

$$\frac{\widehat{G_{acq i}}}{\widehat{G_{acq 4}}} \text{ et } \frac{\widehat{R_{Mi}}}{\widehat{R_E}}, \text{ cette dernière étant invariable en fréquence}$$

➤ mesures :

15 Pour les fréquences utiles à mesurer  $\omega = \omega_{Uj}$ , on dispose des mesures pour  $i$  de 1 à 3 :

$$V_{ciN} = G_{acq i} \cdot R_{Mi} \cdot T_{vi} \cdot \frac{H_{exi}}{k_{CRI}} \quad (p)$$

$$20 \quad V_{ciN} = G_{acq i} \cdot R_{Mi} \cdot T_{vi} \cdot \frac{H_{ex i norm}}{k_{CRI}} \cdot i_{Ej}$$

$$V_{ciN} = \frac{G_{acq i}}{G_{acq 4}} \cdot \frac{R_{Mi}}{R_E} \cdot T_{vi} \cdot \frac{H_{ex i norm}}{k_{CRI}} \cdot V_{ENij}^{(4)}$$

$$H_{ex i norm} = k_{CRI} \left( \frac{G_{acq i}}{G_{acq 4}} \cdot \frac{R_{Mi}}{R_E} \cdot T_{vi} \cdot V_{ENij}^{(4)} \right)^{-1} V_{ciN} \quad (q)$$

25 On vérifie que dans cette expression le terme entre parenthèse est entièrement déduit des calibrations,  $k_{CRI}$  étant considéré comme connu et

constant. On a donc atteint le but assigné : mesure en continu et calibration de tous les paramètres de la mesure sans interruption de la mesure.

Bien entendu, les exemples de réalisation décrits ne sont nullement  
5 limitatifs de l'invention. Ainsi, on n'a pas tenu compte, dans la suite de la description, des champs perturbateurs mentionnés en relation avec la Figure 2. Il est évident que ces champs perturbateurs peuvent être éliminés par le procédé auquel il a été fait allusion, basé sur les variations en fonction de la  
10 fréquence, mais qui ne fait pas partie de la présente invention.

10

15

## REVENDICATIONS

5           1. Procédé de mesure magnétique de la position et de l'orientation  
d'un objet mobile par rapport à une structure fixe, dans lequel un premier  
ensemble émetteur inclut au moins deux bobines orthogonales d'émission de  
champs magnétiques, solidaires de ladite structure fixe, qui définissent un  
repère de référence, et des moyens d'émission pour injecter dans lesdites  
10 bobines des courants d'émission prédéterminés à des premières fréquences,  
dans lequel un second ensemble capteur inclut au moins deux bobines  
orthogonales de détection de champs magnétiques, solidaires dudit objet  
mobile, des voies de capteurs à boucles d'asservissement pour produire  
dans des bobines de contre-réaction couplées auxdites bobines de détection  
15 des champs magnétiques de contre-réaction par injection de courants de  
mesure et une voie de calibration pour élaborer au moins une tension de  
calibration, et dans lequel au moins une voie d'acquisition est prévue pour  
extraire des valeurs de mesure desdites voies d'émission, desdites voies de  
capteurs et de ladite voie de calibration et des moyens de calcul et de  
20 traitement estiment, à partir desdites valeurs de mesure, les champs  
magnétiques détectés dans le second ensemble capteur et en déduisent la  
position et l'orientation dudit objet mobile dans ledit repère de référence, ledit  
procédé étant caractérisé en ce que ladite tension de calibration ne comporte  
que des termes à au moins deux fréquences distinctes desdites premières  
25 fréquences et en ce que ledit procédé comprend une étape d'injection de  
tensions et courants de calibration dans lesdites voies du capteur pour  
produire des valeurs de mesure de calibration identifiées par leur fréquence,  
une étape d'estimation par les moyens de calcul de la fonction de transfert  
de chacune des voies de capteur et une étape de déduction par lesdits  
30 moyens de calcul des champs magnétiques détectés à partir desdites  
valeurs de mesure et de l'inverse desdites fonctions de transfert estimées.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les boucles  
d'asservissement des voies de capteur fournissent des tensions de sortie  
35  $(V_{e1} \text{ à } V_{e3})$  produisant lesdits courants de mesure et lesdits courants de



mesure s'écoulent à travers des résistances de mesure ( $R_{M1}$  à  $R_{M3}$ ) pour fournir des tensions de mesure ( $V'_{e1}$  à  $V'_{e3}$ ), caractérisé en ce que l'on superpose la tension de calibration auxdites tensions de sortie pour la production desdits courants de mesure, et en ce que ladite étape

5 d'estimation des fonctions de transfert s'effectue, à partir de la séparation des termes fréquentiels de calibration dans lesdites tensions de sortie, par approximation polynomiale pour lesdites premières fréquences.

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que l'on

10 injecte les courants de calibration sur lesdites résistances de mesure et en ce que la valeur des composants variables desdites voies des capteurs est identifiée à partir de la séparation des termes fréquentiels de calibration dans les tensions de sortie et les tensions de mesure.

15 4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que la séparation des termes fréquentiels de calibration et leur mesure s'effectue à l'aide d'une voie d'acquisition séparée ( $G_{acq4}$ ) multiplexée dans le temps pour traiter pendant un cycle de calibration les tensions de mesure des voies de capteur, les courants d'émission, la voie de calibration et les tensions de

20 sortie des voies de capteur.

5. Dispositif de mesure magnétique de la position et de l'orientation d'un objet mobile par rapport à une structure fixe, du type comprenant :

- 25 - un premier ensemble émetteur incluant au moins deux bobines ( $12_1$  à  $12_3$ ;  $Bb_E$ ) orthogonales d'émission de champs magnétiques, solidaires de ladite structure fixe et définissant un repère de référence, et des moyens d'émission ( $100, 11_1$  à  $11_3, 13_1$  à  $13_3$ ;  $R_E$ ) pour injecter dans lesdites bobines
- 30 des courants ( $i_{E1}$  à  $i_{E3}$ ) prédéterminés à des premières fréquences et constituer avec lesdites bobines au moins deux voies d'émission ;
- un second ensemble capteur incluant au moins deux bobines ( $13$ ;  $Bb_{d1}$  à  $Bb_{d3}$ ) orthogonales de détection de champs
- 35 magnétiques, solidaires dudit objet mobile, des moyens de

mesure (21 à 25,  $Bb_{CR}$ ,  $R_M$ ) par boucles d'asservissement, pour produire dans des bobines de contre-réaction ( $Bb_{CR1}$  à  $Bb_{CR3}$ ) couplées auxdites bobines de détection des champs magnétiques de contre-réaction par injection de courants de mesure ( $i_{c1}$  à  $i_{c3}$ ) et pour constituer avec lesdites bobines de détection au moins deux voies de capteur, et des moyens de calibration comprenant une voie de calibration ( $CNA_{cal}$ ,  $Bl$ , 30) pour élaborer au moins une tension de calibration ( $V_{cal}$ ) à des secondes fréquences ;

- au moins une voie d'acquisition (28,  $Bl$ ,  $CAN_E$  ;  $Am_1$  à  $Am_4$ ,  $F_1$  à  $F_4$ ,  $Bl$ ,  $CAN$ ) de mesures pour extraire des valeurs de mesure ( $V'_{c1N}$  à  $V'_{c3N}$ ,  $V_{EN}$ ) desdites voies d'émission, desdites voies de capteur et de ladite voie de calibration ; et

- des moyens de calcul et de traitement (60) pour estimer, à partir desdites valeurs de mesure, les champs magnétiques détectés dans le second ensemble capteur et en déduire la position et l'orientation dudit objet mobile dans ledit repère de référence,

caractérisé en ce que lesdites secondes fréquences sont distinctes desdites premières fréquences, en ce que lesdits moyens de calibration sont prévus pour injecter des tensions et courants de calibration dans lesdites voies de capteur pour produire des valeurs de mesure de calibration identifiées par leurs fréquences et adressées auxdits moyens de calcul par la ou lesdites voies d'acquisition et en ce que lesdits moyens de calcul et de traitement (60) sont prévus pour estimer la fonction de transfert de chacune des voies de capteur et déduire les champs magnétiques détectés desdites valeurs de mesure et de l'inverse desdites fonctions de transfert estimées.

6. Dispositif selon la revendication 5, caractérisé en ce que lesdites voies de capteur comprennent chacune une bobine de contre-réaction ( $Bb_{CR1}$  à  $Bb_{CR3}$ ) bobinée sur le même noyau magnétique que la bobine de détection associée ( $Bb_{d1}$  à  $Bb_{d3}$ ), des moyens amplificateurs correcteurs (22, 23 ; 41 à 43) pour générer à partir du signal aux bornes de la bobine de détection une tension de sortie ( $V_{c1}$  à  $V_{c3}$ ), et des moyens

amplificateurs/générateurs de courant ( $24, R_s ; 241 \text{ à } 243, R_{s1} \text{ à } R_{s3} ; A_{21} \text{ à } A_{23}$ ) pour élaborer un courant de contre-réaction ( $i_c ; i_{c1} \text{ à } i_{c3}$ ) injecté dans la bobine de contre-réaction associée et une résistance ( $R_{M1} \text{ à } R_{M3}$ ) de mesure du courant de contre-réaction traversée par ledit courant pour fournir une tension de mesure ( $V'_{c1} \text{ à } V'_{c3}$ ), et en ce que lesdits moyens de calibration comprennent en outre des premiers moyens (44 à 46) d'injection de la tension de calibration sur lesdits moyens amplificateurs/générateurs de courant et des seconds moyens (31, 51 à 53) d'injection d'un courant de calibration ( $i_{cal}$ ) proportionnel à ladite tension de calibration ( $V_{cal}$ ) sur lesdites résistances de mesure ( $R_{M1} \text{ à } R_{M3}$ ).

7. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que lesdites voies d'acquisition comprennent des premières voies d'acquisition ( $G_{acq1} \text{ à } G_{acq3}$ ) pour traiter en continu lesdites tensions de mesure respectivement de chaque voie de capteur, une voie d'acquisition échantillonnée ( $G_{acq4}$ ) pour traiter en multiplex dans le temps les signaux de calibration présents dans lesdites tensions de sortie des voies de capteur, dans les tensions de mesure de ces mêmes voies et dans la somme des courants d'émission, et lesdits courants d'émission ; et des moyens de multiplexage (55, 56) pour appliquer sur l'entrée de ladite voie d'acquisition échantillonnée lesdits signaux traités par cette dernière.

1/5

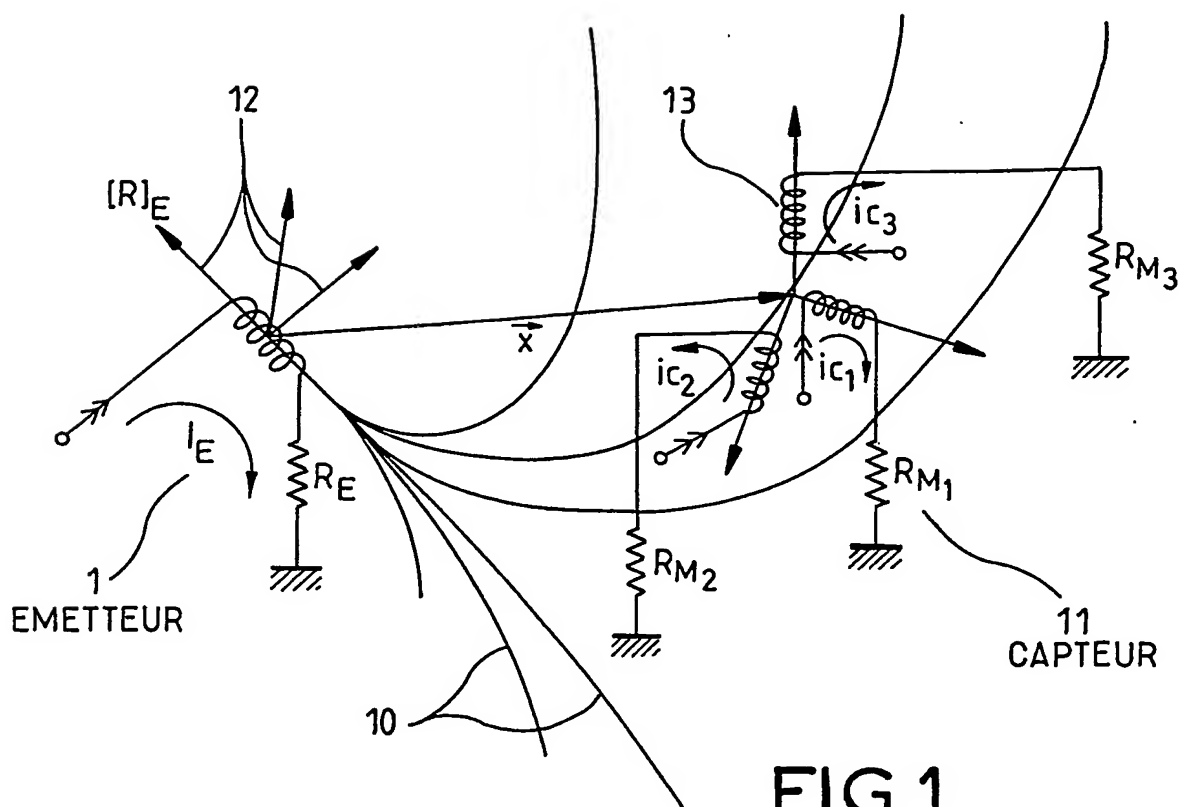


FIG.1

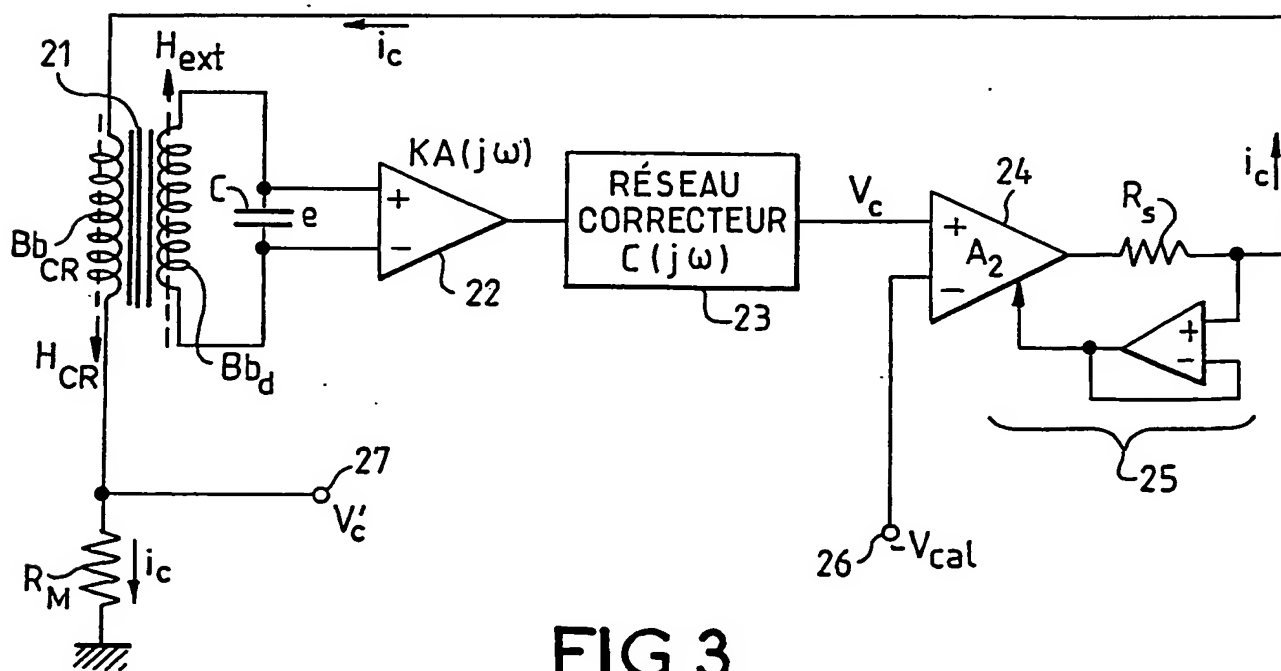


FIG.3

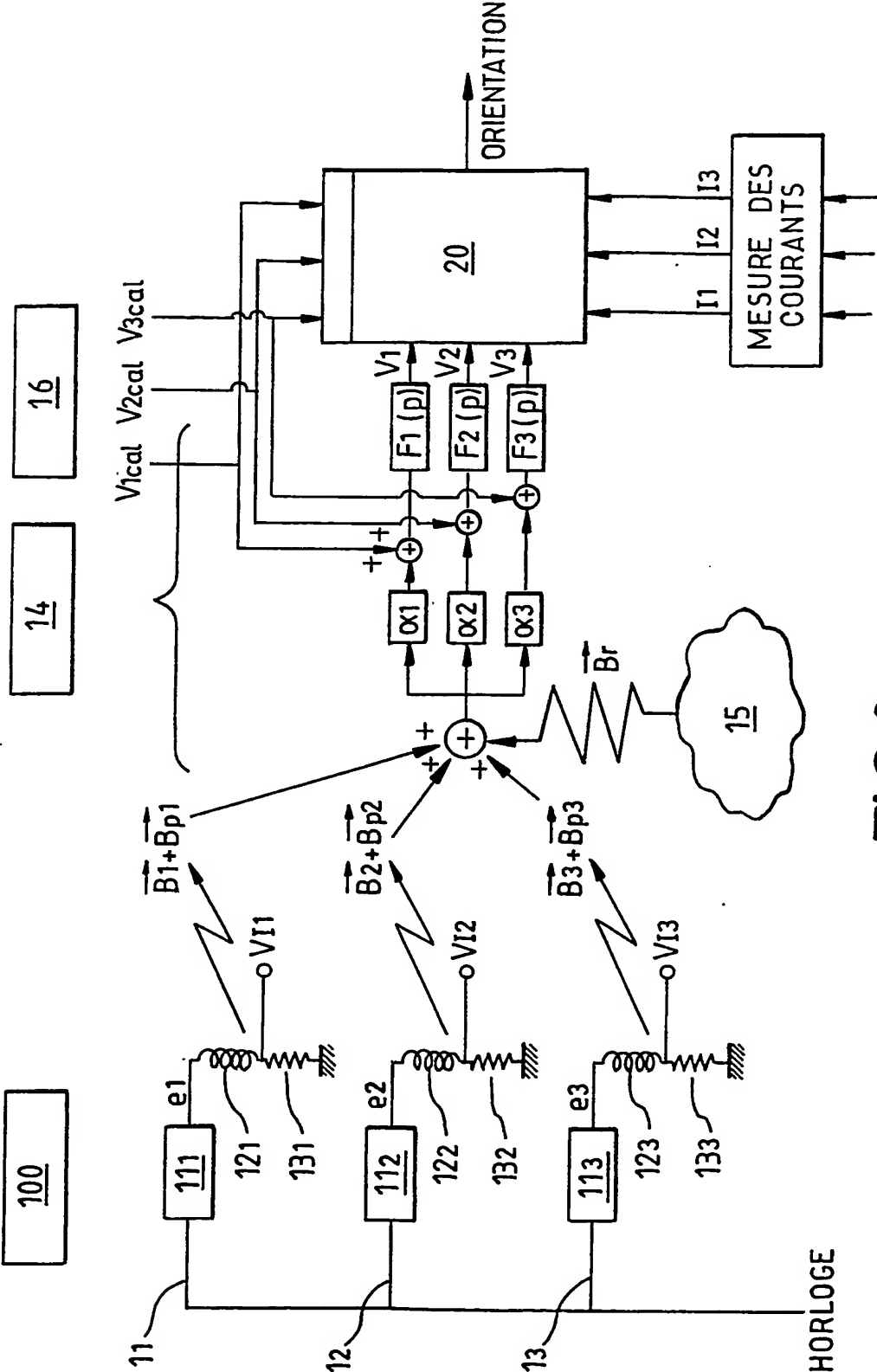


FIG.2

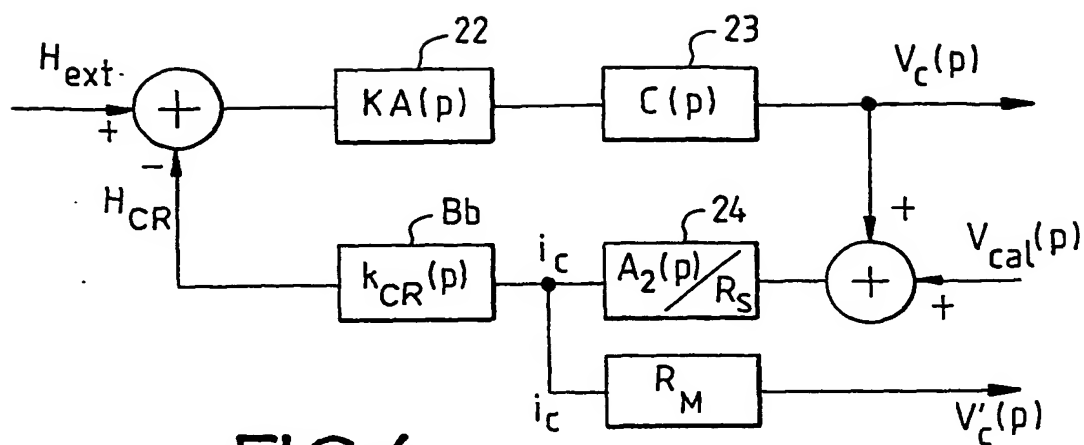


FIG. 4

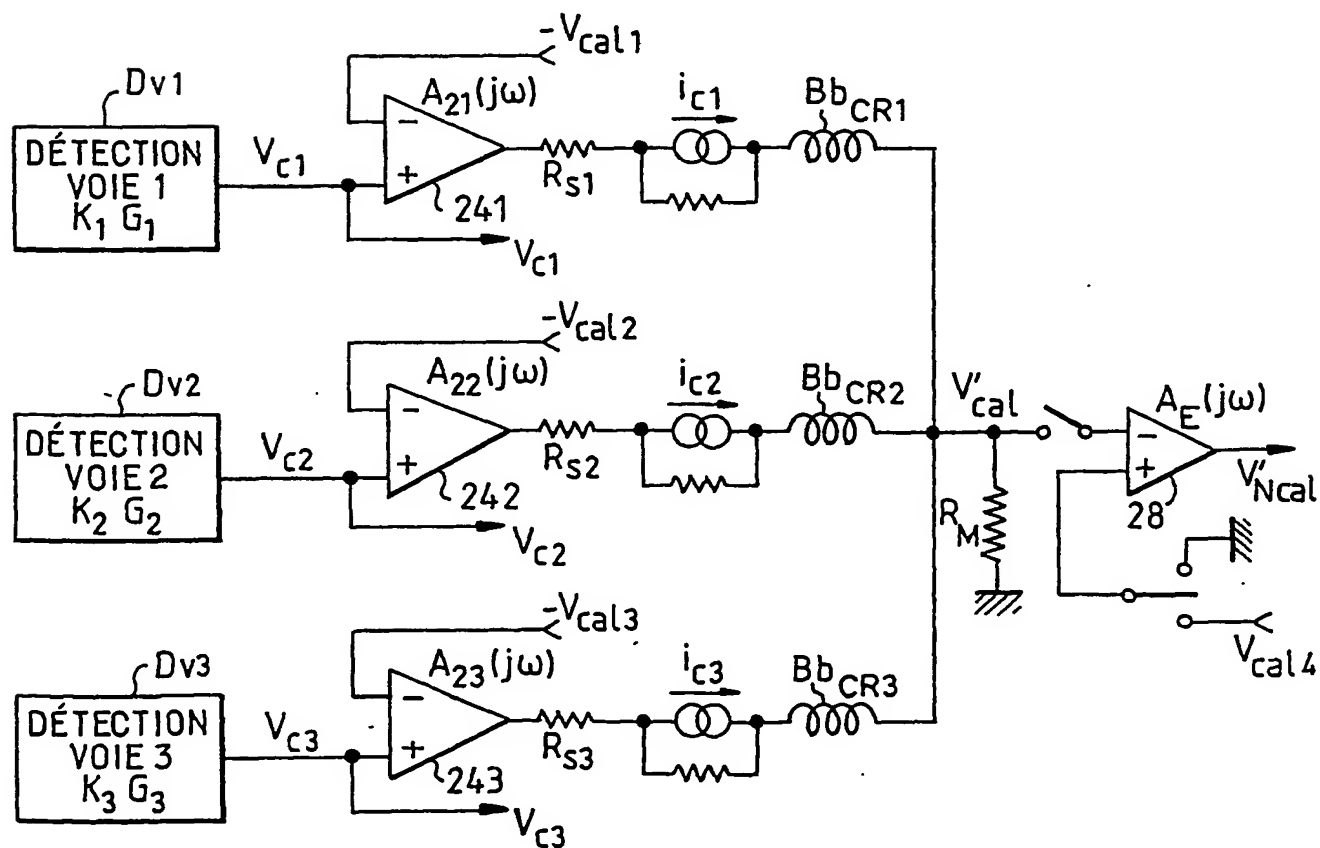
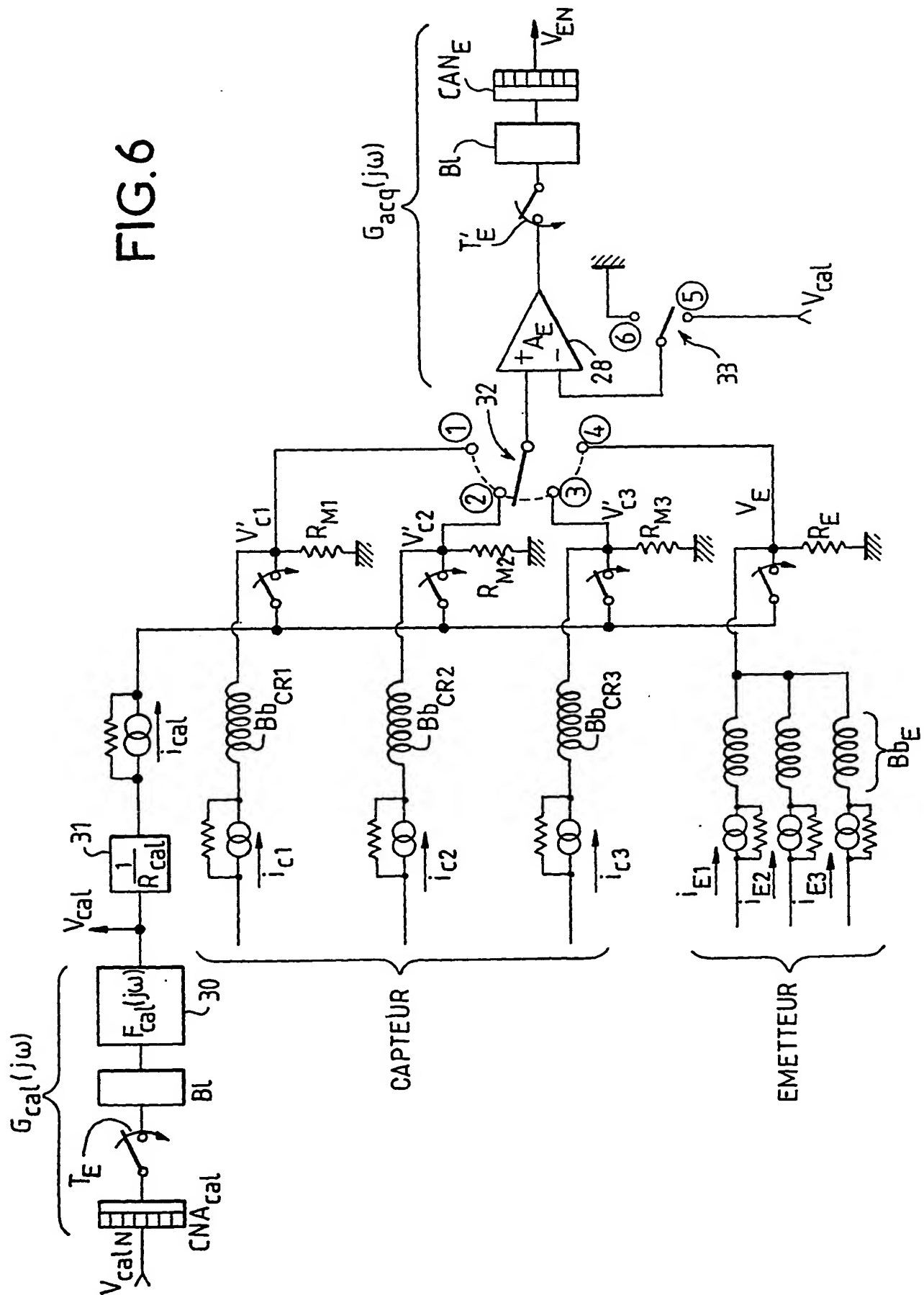


FIG. 5

FIG.6



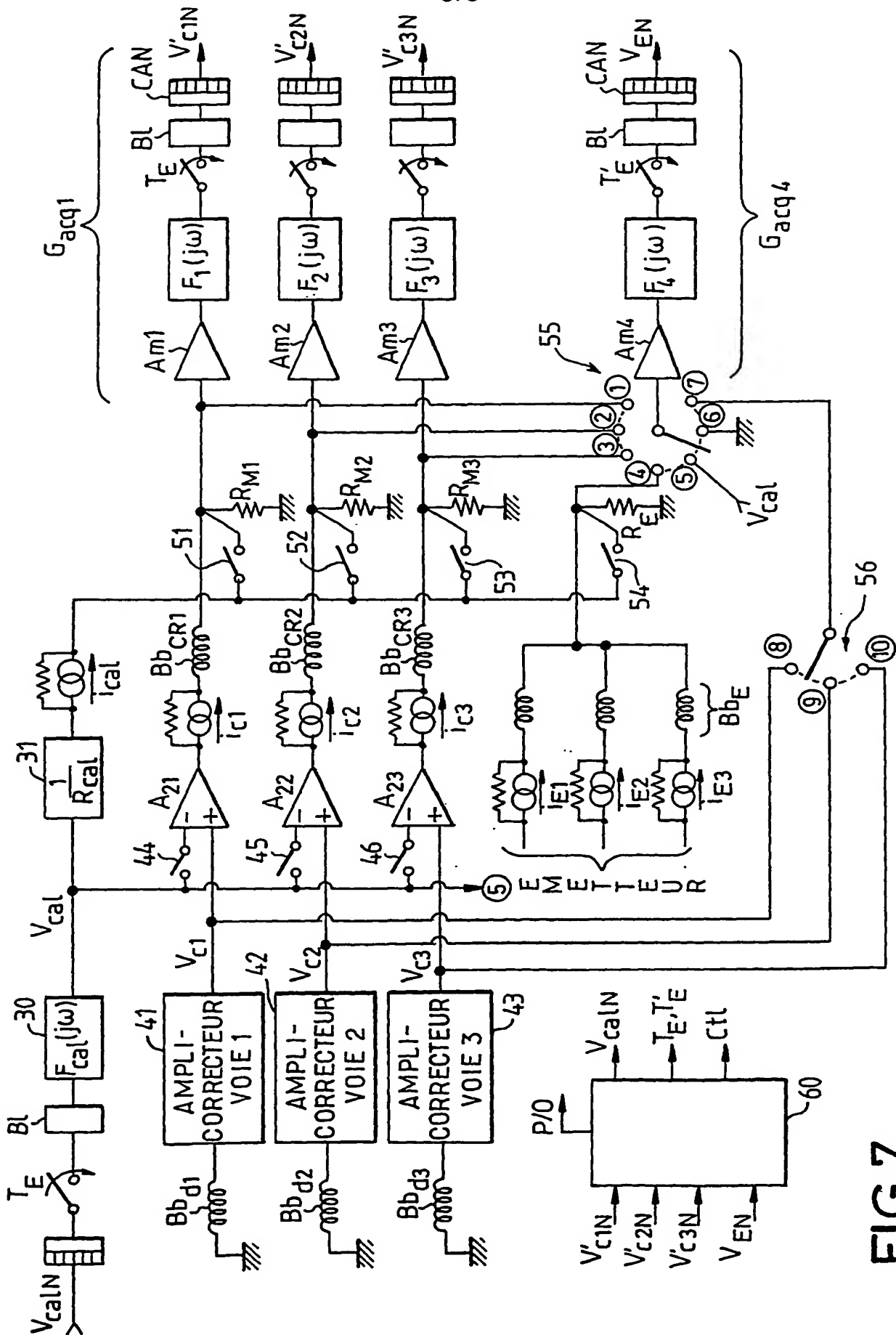


FIG.7



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR 02/04507

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
 IPC 7 G01B7/004 G01D5/20

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01B G01D G01K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 01 79778 A (LESCOURRET JEAN LOUIS ;THALES AVIONICS S A (FR)) 25 October 2001 (2001-10-25) the whole document ---	1-7
A	US 5 646 525 A (GILBOA PINHAS) 8 July 1997 (1997-07-08) the whole document ---	1-7
A	EP 1 014 061 A (RUHRGAS AG) 28 June 2000 (2000-06-28) paragraph '0022! ---	1,5
A	US 5 857 777 A (SCHUH WILLIAM C) 12 January 1999 (1999-01-12) abstract -----	1-3,5

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

\* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*&\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

28 August 2003

Date of mailing of the international search report

04/09/2003

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
 Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Ramboer, P

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR 02/04507

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 0179778	A	25-10-2001	FR 2807831 A1 EP 1272805 A1 WO 0179778 A1 US 2003139895 A1	19-10-2001 08-01-2003 25-10-2001 24-07-2003
US 5646525	A	08-07-1997	IL 108599 A AT 160011 T DE 69315000 D1 EP 0576187 A1 US 5646524 A	15-04-1997 15-11-1997 11-12-1997 29-12-1993 08-07-1997
EP 1014061	A	28-06-2000	DE 19859149 A1 EP 1014061 A1	29-06-2000 28-06-2000
US 5857777	A	12-01-1999	AU 4591197 A WO 9813677 A1	17-04-1998 02-04-1998

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande nationale No

PCT/FR 02/04507

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE  
CIB 7 G01B7/004 G01D5/20

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G01B G01D G01K

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	WO 01 79778 A (LESCOURRET JEAN LOUIS ;THALES AVIONICS S A (FR)) 25 octobre 2001 (2001-10-25) le document en entier	1-7
A	US 5 646 525 A (GILBOA PINHAS) 8 juillet 1997 (1997-07-08) le document en entier	1-7
A	EP 1 014 061 A (RUHRGAS AG) 28 juin 2000 (2000-06-28) alinéa '0022!	1,5
A	US 5 857 777 A (SCHUH WILLIAM C) 12 janvier 1999 (1999-01-12) abrégé	1-3,5

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

\* Catégories spéciales de documents cités:

- \*A\* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- \*E\* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- \*L\* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- \*O\* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- \*P\* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- \*T\* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- \*X\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- \*Y\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- \*Z\* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

28 août 2003

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

04/09/2003

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Ramboer, P

**RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE**

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale No

PCT/FR 02/04507

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 0179778	A	25-10-2001	FR 2807831 A1	19-10-2001
			EP 1272805 A1	08-01-2003
			WO 0179778 A1	25-10-2001
			US 2003139895 A1	24-07-2003
US 5646525	A	08-07-1997	IL 108599 A	15-04-1997
			AT 160011 T	15-11-1997
			DE 69315000 D1	11-12-1997
			EP 0576187 A1	29-12-1993
			US 5646524 A	08-07-1997
EP 1014061	A	28-06-2000	DE 19859149 A1	29-06-2000
			EP 1014061 A1	28-06-2000
US 5857777	A	12-01-1999	AU 4591197 A	17-04-1998
			WO 9813677 A1	02-04-1998